

Триботехнические и физико-механические свойства штамповой стали, подвергнутой комбинированной ионно-плазменной обработке

А. Леонов, Ю. Денисова, В. Денисов, М. Савчук, В. Тищенко*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**laa-91@yandex.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты исследования триботехнических и физико-механических свойств штамповой стали X12МФ, подвергнутой комбинированной ионно-плазменной обработке, включающей в себя ионно-плазменное азотирование и вакуумно-дуговое напыление на азотированный подслоя покрытий системы (Ti, Cr)N. Азотирование проводилось в двух режимах, при которых отсутствовал «белый» нитридный слой и формировался. Нитридный слой был толщиной 5–7 мкм, а толщина диффузионного слоя около 55–70 мкм. Было показано, что комбинированная обработка позволяет существенно снизить коэффициент трения и параметра износа, а также приводит увеличению микротвердости.

Ключевые слова: сталь, триботехнические и физико-механические свойства, ионно-плазменное азотирование, вакуумно-дуговое напыление.

1. Введение

Инструментальная сталь для холодного деформирования или штамповая сталь X12МФ широко применяется в производстве штампов и инструментов благодаря своим исключительным свойствам, таким как высокое сопротивление размягчению, хорошая износостойкость, высокая закаливаемость и т.д. [1]. Для увеличения срока службы штампов широко используются керамические покрытия, осаждаемые вакуумно-дуговым методом [2–5]. Однако в условиях высоких переменных нагрузок свойства осажденных покрытий часто ограничиваются пластической деформацией штампа. Если стальной штамп не способен выдержать контактную нагрузку и подвергается деформации, то это приводит к преждевременному разрушению покрытия. Чтобы решить эту проблему применяют предварительную химико-термическую обработку (азотирование, алитирование, борирование и др.) штампов перед осаждением керамического покрытия, с целью дополнительного упрочнения поверхности [6–9]. Таким образом, комбинированная обработка, состоящая из азотирования и осаждения керамического покрытия, является привлекательным методом для увеличения несущей способности, улучшения усталостной прочности и триботехнических свойств стали [10]. В связи с этим, целью данной работы является исследование триботехнических и физико-механических свойств штамповой стали X12МФ после комбинированной обработки, включающей ионно-плазменное азотирование и вакуумно-дуговое напыление на азотированный подслоя покрытий системы (Ti, Cr)N.

2. Материалы и методы исследования

В качестве материала для исследования использовалась предварительно закаленная штамповая сталь X12МФ. Перед комбинированной обработкой образцы шлифовались и полировались до зеркального блеска. Шероховатость поверхности (R_a) исходных образцов составляла 0.05 мкм. Азотирование стальных образцов производилось в плазме, генерируемой в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом на экспериментальной установке. Азотирование проводилось в режимах, при которых на поверхности отсутствовал «белый» нитридный слой (давление – 0.25 Па, газовая смесь – N_2+Ar (50/50), обозначен А0.25) и формировался нитридный слой (давление – 1 Па, газ – N_2 (100%), обозначен А1). Применяемые режимы азотирования выбрали на основании предыдущих исследований [11]. Постоянными параметрами в процессах азотирования были: напряжение смещения подложки -600 В, температура подложки 520°C и время азотирования

3 ч. Напыление покрытий осуществляли вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом на установке ННВ-6.6-И1. Для генерации потока металлической плазмы использовались два дуговых испарителя с цилиндрическими катодами диаметром 80 мм из Ti марки ВТ1-0 и Cr (99.8 %). Источник газовой плазмы с накаливаемым и полым катодом «ПИНК» использовали для нагрева образцов и предварительной очистки их поверхности путём ионного травления, а также для дополнительной ионизации газа. Напыляли однослойное покрытие CrN при токе электродугового испарителя 90 А и композитное однослойное покрытие TiCrN при одновременной работе Ti и Cr испарителей при токах 80 А и 80 А, соответственно. Постоянные параметры при напылении: напряжение смещения подложки -150 В, температура подложки 390–400°C, азот-аргоновая газовая смесь (90%N₂ и 10%Ar) при давлении 0.6 Па. Структуру образцов исследовали на микровизоре μVizo-MET-221 (ЛОМО, Россия). Триботехнические испытания покрытий осуществляли на трибометре TRIBOtechnic (Франция) в условиях сухого трения при возвратно-поступательном перемещении образца относительно контртела, которое представляло собой шарик из Al₂O₃ диаметром 6 мм. Скорость перемещения образца 25 мм/с, нагрузка на шарик 12 Н, длина трека 5 мм, путь трения 100 м. Измерения микротвердости по Виккерсу проводили на приборе ПМТ-3 (ЛОМО, Россия) при нагрузке на индентор P = 0.5 Н.

3. Результаты исследования

На Рис.1 представлены оптические изображения, показывающие микроструктуру азотированных образцов. Из Рис.1а видно, что у образца, азотированного по режиму 1, нитридный слой отсутствует и толщина диффузионного слоя около 55–65 мкм. У образца, азотированного по режиму 2 толщина «белого» нитридного слоя 5–7 мкм (Рис.1б), а толщина диффузионного слоя около 70 мкм.

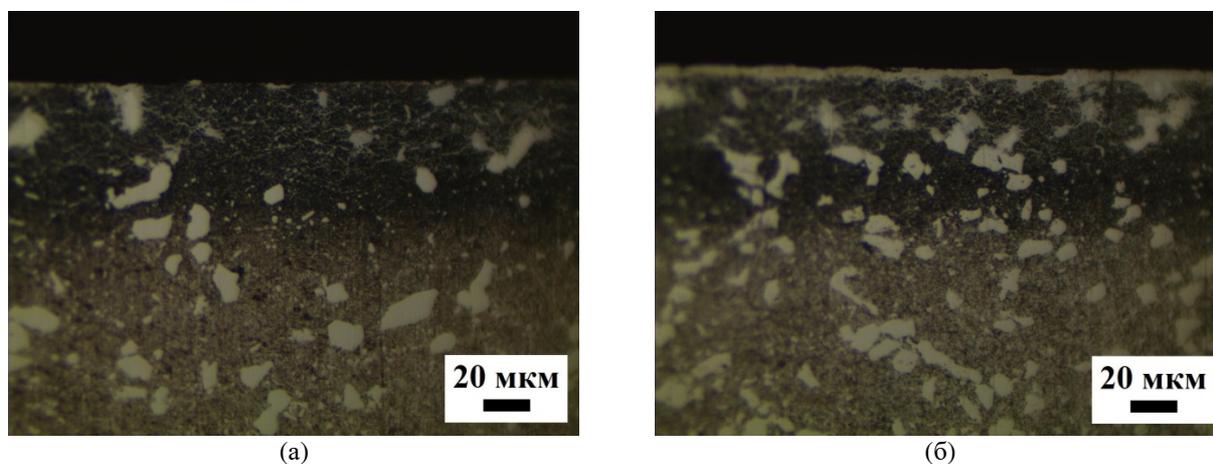


Рис.1. Оптические изображения структуры поперечных шлифов азотированных образцов: по режиму 1 без нитридного слоя (а) и по режиму 2 с нитридным слоем (б).

На Рис.2 представлены результаты трибоиспытаний. Из Рис.2, что азотирование поверхности стали X12МФ (образцы А0.25-исх и А1-исх) приводит к снижению, как коэффициента трения, так и параметра износа по сравнению с исходной закаленной сталью. Однако, образец без нитридного слоя (А0.25-исх) имел более лучшие значения триботехнических характеристик, чем образец с нитридным слоем (А1-исх). Параметр износа снизился почти в 8 раз для образца без нитридного слоя (А0.25-исх) и снизился в 4 раза для образца с нитридным слоем (А1-исх). Также проводились исследования, где азотированные образцы подвергались полировке, и было обнаружено, что полировка

способствует улучшению триботехнических характеристик (Рис.2, образцы А0.25-пол и А1-пол). В частности, для образца без нитридного слоя удалось снизить параметр износа с $29 \cdot 10^{-7}$ до $9,8 \cdot 10^{-7}$ $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ и коэффициент трения с 0.519 до 0.44. Для образца с нитридным слоем параметр износа снизился с $53 \cdot 10^{-7}$ до $17,3 \cdot 10^{-7}$ $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$, а коэффициент трения с 0.527 до 0.461. В связи с этим напыление покрытий осуществляли на азотированные образцы после полировки. Из Рис.2 видно, что для каждой партии азотированных образцов с покрытиями, нитридный слой не оказывает значительного влияния на триботехнические характеристики. Наименьший коэффициент трения (0.159) имеют азотированные образцы стали X12MФ с покрытием TiCrN, а наименьший параметр износа ($2,08\text{--}2,13 \cdot 10^{-7}$ $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$) имеют образцы с покрытием CrN.

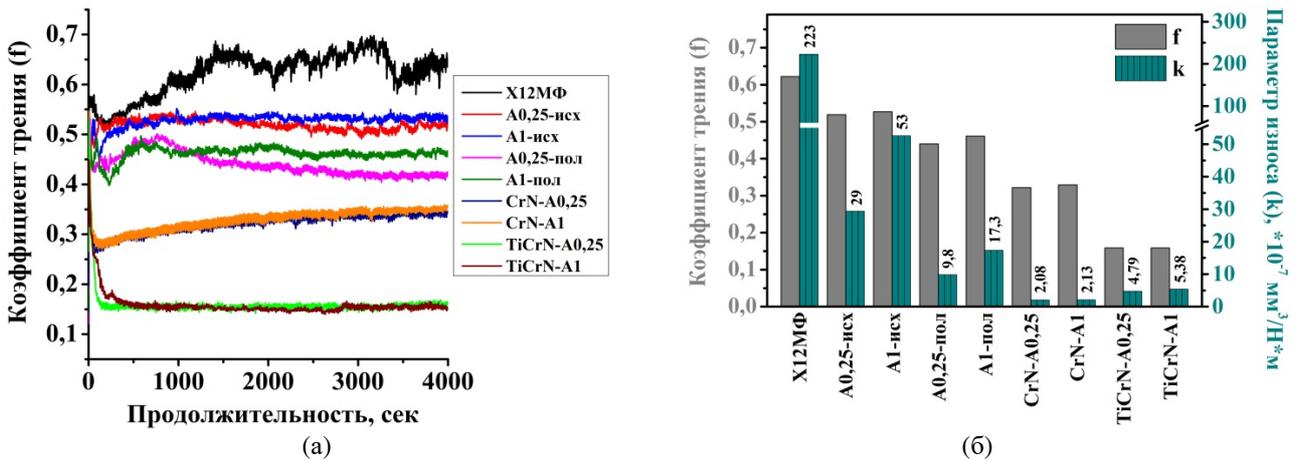


Рис.2. Кривые коэффициента трения от времени трибоиспытаний (а) и гистограмма коэффициента трения и параметра износа (б).

Микротвердость исходного образца закаленной стали X12MФ составляла $9,1 \pm 0,5$ ГПа. Азотирование поверхности стали X12MФ привело к повышению микротвердости (Рис.3) до $12,1 \pm 0,8$ ГПа (режим 1 – А0.25-исх) и до $13,6 \pm 1$ ГПа (режим 1 – А1-исх). Комбинированная обработка приводит к более существенному повышению микротвердости, так микротвердость азотированных образцов с покрытиями CrN составляла $19,7\text{--}20,1$ ГПа, а с покрытиями TiCrN – $23,7\text{--}24,0$ ГПа.

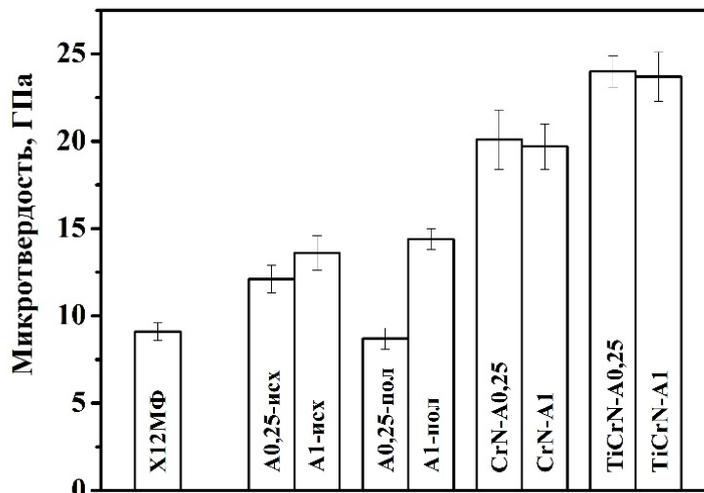


Рис.3. Микротвердость исследуемых образцов.

4. Выводы

В работе было проведено исследование триботехнических и физико-механических свойств штамповой стали Х12МФ после комбинированной обработки, включающей ионно-плазменное азотирование и вакуумно-дуговое напыление на азотированный подслоя покрытий системы (Ti, Cr)N. Было показано, что комбинированная обработка позволяет существенно снизить коэффициент трения до 0.159, исходная сталь Х12МФ имела значение 0.622 и параметр износа до $2.08 \cdot 10^{-7}$ мм³/Н·м (сталь Х12МФ – $223 \cdot 10^{-7}$ мм³/Н·м). Кроме того, при комбинированной обработке наблюдается повышение микротвердости до 24 ГПа, что более чем в 2.5 раза больше, чем у стали Х12МФ.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001.

5. Список использованной литературы

- [1] Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П., *Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений*, (Москва: Машиностроение, 1990).
- [2] Колубаев А.В., Сизова О.В., Денисова Ю.А., Леонов А.А., Терюкалова Н.В., Новицкая О.С., Белый А.В., *Физ. мезомех.*, **25**(2), 35, 2022; doi: 10.55652/1683-805X_2022_25_2_35
- [3] Филиппов А.В., Шамарин Н.Н., Москвичев Е.Н., Новицкая О.С., Княжев Е.О., Денисова Ю.А., Леонов А.А., Денисов В.В., *Обраб. метал.*, **24**(1), 87, 2022; doi: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-87-102
- [4] Денисов В.В., Денисова Ю.А., Варданян Э.Л., Островерхов Е.В., Леонов А.А., Савчук М.В., *Изв. высш. учеб. завед. Физика*, **64**(1), 125, 2021; doi: 10.17223/00213411/64/1/125
- [5] Савостиков В.М., Денисова Ю.А., Денисов В.В., Леонов А.А., Овчинников С.В., Савчук М.В., *Изв. высш. учеб. завед. Физика*, **64**(12), 43, 2021; doi: 10.17223/00213411/64/12/43
- [6] Тересов А.Д., Денисова Ю.А., Денисов В.В., Леонов А.А., Петрикова Е.А., Ковальский С.С., *Изв. высш. учеб. завед. Физика*, **64**(11), 164, 2021; doi: 10.17223/00213411/64/11/164
- [7] Leonov A.A., Ivanov Yu.F., Kalashnikov M.P., Abdulmenova E.V., Shugurov V.V., and Teresov A.D., *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **731**, 012015, 2020; doi: 10.1088/1757-899X/731/1/012015
- [8] Leonov A.A., Ivanov Yu.F., Kalashnikov M.P., Abdulmenova E.V., Paygin V.D., and Teresov A.D., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1393**, 012106, 2019; doi: 10.1088/1742-6596/1393/1/012106
- [9] Leonov A.A., Kuzichkin E.E., Shugurov V.V., Teresov A.D., Kalashnikov M.P., Petyukevich M.S., Polissadova V.V., and Ivanov Yu.F., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1115**, 032040, 2018; doi: 10.1088/1742-6596/1115/3/032040
- [10] Weinhold T., Dalke A., Schramm A., and Biermann H., *Engin. rep.*, e12377, 2021; doi: 10.1002/eng2.12377
- [11] Denisova Y., Leonov A., Denisov V. and Ostroverkhov E., *Proc. 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2020)*, 522, Tomsk, 2020; doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9242189